Research on the Synchronous Detection Method of Unidirectionally Focused SV Waves and Surface Waves*

CHEN Tao[1*], Liu Shucheng[1], LÜ Cheng[2], LOU Tingyu[2], SONG Xiaochun[1], WU Qiao[1]
(1.School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China;
2.Hubei Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Wuhan Hubei 430077, China)

Abstract: For the synchronous detection requirements of internal and external defects in thick-walled pipes, a serpentine coil is proposed, which can synchronously excite unidirectionally focused SV waves and surface waves. Firstly, a serpentine coil detection model is established by using the finite element simulation method to study the synchronous excitation method of unidirectionally focused SV waves and surface waves by the composite probe. Secondly, the composite signal separation strategy and the influence patterns of deep and surface-level defects on the two types of signals are focuses on. Lastly, a physical probe is fabricated and experimental studies are conducted, successfully exciting unidirectionally focused SV waves and surface waves on the composite coil and detecting internal and external defects in thick-walled pipes. The experimental results show that the composite detection probe designed can detect circumferential surface cracks of 20 mm in length, 2.0 mm in width, and 2.0 mm in depth on the external surface of thick-walled pipes, as well as hole defects with a diameter of 4.0 mm and depth of 20 mm on the inner surface. An electromagnetic ultrasonic coil capable of synchronously exciting SV waves and surface waves is designed, where the excited composite signal can cover the entire detection area of thick-walled pipes, and the signal-to-noise ratio of SV waves and surface waves is enhanced through unidirectional excitation. With further optimization, the probe is expected to be used for the synchronous detection of deep and surface-level defects in pressure pipes.

Key words: unidirectional electromagnetic ultrasound; oblique incident SV wave; surface wave; pressure pipeline; multidimensional detection
EEACC: 7220; 7810C **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.018

单向聚焦 SV 波与表面波同步检测方法研究*

陈 涛[1*], 刘书成[1], 吕 程[2], 楼听雨[2], 宋小春[1], 吴 樵[1]
(1.湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068; 2.湖北特种设备检验检测研究院, 湖北 武汉 430077)

摘 要: 针对厚壁管道的内、外部缺陷同步检测需求, 设计了一种可同步激励单向聚焦 SV 波与表面波的曲折线圈。首先, 利用有限元仿真方法建立了曲折线圈检测模型, 研究复合探头的单向聚焦 SV 波与表面波同步激励方法; 其次, 研究复合信号分离策略及深层和表层缺陷对两种信号的影响规律; 最后, 制作探头实物, 并开展实验研究。实验结果表明: 所设计的复合检测探头可从厚壁管道外部探测到外表面长 20.0 mm、宽 2.0 mm、深 2.0 mm 的表面裂纹, 以及内部直径为 4.0 mm、深度为 20 mm 的孔缺陷。设计了一种能够同步激励 SV 波及表面波的电磁超声线圈, 激励出的复合信号能够覆盖厚壁管道的全部检测区域, 且通过单向激励增强了 SV 波与表面波的信噪比。探头经过进一步优化, 有望用于压力管道深层与表层缺陷的同步检测。

关键词: 单向电磁超声; 斜入射 SV 波; 表面波; 厚壁管道; 多维检测
中图分类号: TH878+.2; TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0606-06

由于受到的载荷及工作环境复杂, 且安全性要求高, 压力管道缺陷的检测方法研究受到了国内外学者的广泛关注[1]。在其制造过程中, 由于受到制造设备和加工工艺等多重因素的制约, 压力管道的表面和内部经常会出现如裂纹、孔洞和夹渣等多种复杂缺陷[2-3]。服役过程中产生的缺陷才是重点。这些潜在的不良因素可能引发重大安全事故, 如管道泄漏、爆炸。因此高效、高精的压力管道复杂缺陷检测方法亟待开发[4-5]。

超声检测技术广泛用于压力管道缺陷检测与监测领域。超声检测技术是利用声波信号的幅值和相位变化来精确评估缺陷的尺寸、位置以及材料的物理性质。与传统的超声检测方法相比, 电磁超声检测技术展现出非接触、无需使用耦合剂的独特优

项目来源: 国家重点研发计划项目(2022YFFO605600); 国家自然科学基金项目(52105550)
收稿日期: 2024-03-06 **修改日期**: 2024-04-02

势[6-7]。然而,这种技术激发的超声波主要呈现为双向传播模式,这种特性导致其能量在传输过程中产生分散,因此在检测之前,常常需要对接收到的信号进行深度的滤波处理和放大。此外,双向传播的特点还增加了信号分析的复杂性。为了更加精确地探测和定位压力管道中的内部和表面缺陷,单向电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer,EMAT)的研究和应用已逐渐成为该领域的重点[8-11]。

在当今科学研究的广阔领域中,单向 EMAT 的设计与优化已逐渐吸引了众多学者的关注和探索。Xie 等[12]在探讨单向瑞利波 EMATs 的波束定向性与线圈长度的关系时,采用完整的分析模型精确地计算了洛伦兹力和超声位移的分布。发现在 EMATs 的线圈长度增加的情况下,其主瓣带宽显著减窄,导致超声的集中性显著增强。这为此类 EMATs 的后续设计与优化提供了参考。针对传统 Lamb 波双向传播难题,Zhan 等[13]设计出一种独特的电磁超声换能器,其创新地采用两个相对弯曲的线圈实现全向传播,从而显著提升了超声信号的检测能力与信噪比。Wang 等[14]提出了单向 EMAT 方案并结合有限元模拟和实验测试进行了验证,有效地解决了传统曲折线圈 EMAT 在接近样品边缘时,将缺陷回波信号与边缘反射信号混淆的问题,为此类 EMAT 的设计与应用铺设了坚实的理论和实践基石。Martinho 等[15]利用偏置的永磁体阵列对 PPMEMATs 进行独特设计改良,巧妙地克服了传统构造中双向传播的剪切水平(Shear Horizontal Wave,SH)波和后向侧瓣问题,经过深入研究个体阵列间距和磁体行数的关系,成功提升了单向 SH 波的发射效率,并显著降低了后向侧瓣的幅度。Sun 等[16]借助倾斜的周期性永磁体(Periodic Permanent Magnet,PPM)成功设计了一种全新的 SH 波电磁超声换能器,实现了超声波的单向聚焦。通过实验和仿真对比倾斜换能器结构与传统平行换能器结构在单向聚焦能力上的差异,结果表明倾斜 PPM 的 SH 导波 EMAT 能够增强聚焦侧的信号,从而提升超声信号的分辨率。Rieger 等[17]采用紧凑的 EMAT 设计在 1 mm 厚钢板中成功实现了超声 Lamb 波的单向传输与接收;借助于两个相邻、纵向扁平的线圈在换能器头部的精准布局及相位调整,强化了特定方向的侧向投射超声场,同时显著抑制其他方向的干扰信号。

目前,针对表面波与 SV 波的复合检测方法研究已取得一定的进展。但是,大多数方法仍需依赖复杂的信号处理电路来分离这两种超声波信号。这不仅增加了检测成本,而且使得整个检测系统变得极为复杂。针对压力管道深层及表层缺陷的快速检测需求,本论文基于惠更斯原理,提出了一种针对压力管道深层及表层缺陷的同步检测方法,沿管道的周向,电磁超声探头能同时激励出正向(反向)传播的表面波与反向(正向)传播的斜入射表面波。

1　EMAT 换能机理

1.1　单向超声导波的换能机理

如图 1 所示,探头结构包括永磁铁、曲折线圈和铝管。在铁磁性材料中,内部粒子受洛伦兹力、磁化力及磁致伸缩力影响;在非铁磁性材料中,以洛伦兹力为主导。双永磁铁放置于待测材料表面,与之形成闭合回路并产生静态磁场。当曲折线圈通入频率为 f 的高频电流,根据法拉第电磁感应定律,线圈下的试件表面会在集肤层上产生与电流方向相反的涡流和动态磁场。在外部磁场的影响下,涡流产生的交变洛伦兹力使待测材料近表层粒子产生规律的高频振动,此宏观振动以超声波形式在材料中传播。

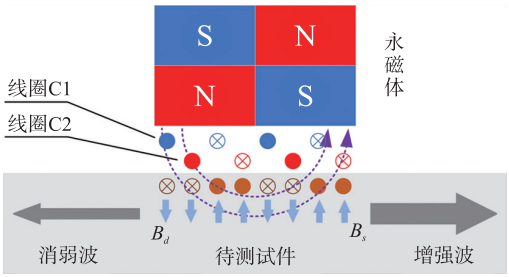

图 1　单向表面波换能原理

1.2　线性叠加原理

在试件厚度超出表面波波长的 4 倍时,利用垂直磁场的线圈能在试件中激发表面波、斜入射 SV 波及纵波。这三种声波传播速度各不相同,故可应用于多个方向的缺陷探测[18]。以铝板为例,其表面波、SV 波和纵波的传播速度分别为 2 909.8 m/s、3 122 m/s 和 6 197.8 m/s。因此,结合线性叠加原理,表面波与 SV 波可以在相反的方向上传播。在电磁超声换能器产生超声波时,其振动的物理表达式为:

$$y=u\cos\left[\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)+\varphi\right] \tag{1}$$

当两线圈中加载频率、相位相同的激励信号时,两超声波叠加后的振动方程可以表示为:

$$\begin{cases} y_1=u_1\cos\left[\omega\left(-t-\dfrac{x}{v}\right)+\varphi\right] \\ y_2=u_2\cos\left[\omega\left(-t-\Delta t-\dfrac{x+\Delta x}{v}\right)+\varphi\right] \\ y=y_1+y_2 \end{cases} \tag{2}$$

式中:y_1 和 y_2 为线圈中 x 轴上质点离开平衡点的位移。u_1 与 u_2 为超声波的位移,Δt 为两个线圈中激励电流延迟时间;Δx 为两个线圈相邻导线的间距。

若需要向右传播的超声波幅值叠加后为 0,则仅需满足 u_1 与 u_2 的幅值等性,并保证两激励线圈的相位差为$(2n\pm1)\pi$,其中 n 表示周期个数。设二者相位差为 π,得到超声波传播的位移方程为:

$$\omega\left(-t-\Delta t-\frac{x+\Delta x}{v}\right)-\omega\left(-t-\frac{x}{v}\right)=\omega\times\frac{T}{2} \tag{3}$$

求解后:

$$\Delta x=\frac{\lambda}{4};\Delta T=\frac{T}{4} \tag{4}$$

计算可知,当两线圈的相对距离是 $\lambda/4$ 时,线圈 C1 电流激励的时间将延后线圈 C2 的电流激励时间 $T/4$。电磁超声换能器向左侧传播的超声波幅度之和为零。向右侧传播的超声波,其位移方程式如下:

$$\omega\left(-t-\Delta t-\frac{x+\Delta x}{v}\right)-\omega\left(-t-\frac{x}{v}\right)=0 \tag{5}$$

将推导出的延迟时间以及线圈的相对间距代入右侧传播的超声波表达式有:

$$-\Delta t-\frac{\Delta x}{v}=0 \tag{6}$$

式(6)计算结果为 0,则两列波相位相同,幅值叠加后为两者幅值之和。

1.3 电磁超声线圈设计

能够同步激励表面波与 SV 波的线圈结构有两种。一种是等间距设计,相邻导线之间的距离为波长的一半,能实现表面波的相长干涉;另外一种是线聚焦结构设计,每根导线到焦点的距离相差半个波长,就能满足 SV 波的相长干涉条件。虽然等间距设计能够较好地满足对表面缺陷的定量需求,但激励的 SV 波辐射角度更大,导致超声能量发散,使得缺陷回波与底部回波难以区分。而聚焦设计激励的 SV 波则具备检测微小缺陷的能力,同时所激励的表面波仍能满足表面缺陷的检测要求。因此,聚焦型线圈表现出更多的优势。

图 2 为斜入射 SV 波线圈的设计原理图。首先设定超声波的激励频率为 f,聚焦点的坐标为(x_F, y_F),线圈左端的初始角度为 θ_1。第 n 根导线的位置记为$(x_n,0)$,第 n 根导线与聚焦线的间距为 r_n。两个线圈的相邻导线与聚焦线之间满足如下条件:

$$r_n-r_{n-1}=\frac{\lambda}{4} \tag{7}$$

$$x_n=x_F-\sqrt{r_n^2-y_F^2} \tag{8}$$

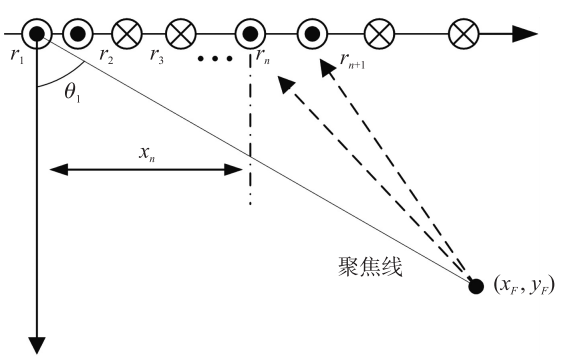

图 2 聚焦 SV 波线圈设计原理

2 单向 EMAT 的仿真

2.1 模型的建立

利用 COMSOL 仿真工具,构建图 3 所示的压力管道周向及轴向缺陷检测的二维仿真模型。

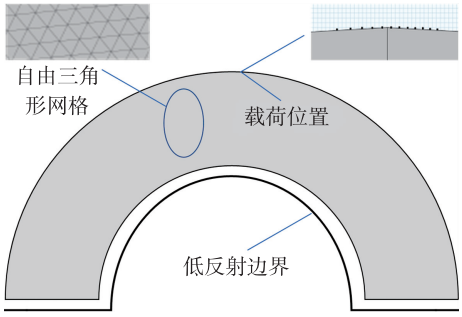

图 3 表面波与斜入射 SV 波有限元仿真

此模型涵盖了铝管与线圈两部分。周向截面中铝管的外径为 200.0 mm,厚度为 25.0 mm,杨氏模量 E 为 70 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 700 kg/m^3。在该模型中,配置了两种不同的缺陷。以周向截面中铝管圆心为原点,向右为正半轴方向,在点(−11 mm, 81 mm)处配置一长为 1.0 mm、高为 5.0 mm 的内部缺陷(单向 SV 波聚焦位置)。在正半轴方向距线圈中心弧长 105 mm 处表面,配置第二个长 1.0 mm、高 3.0 mm 的表面缺陷。激励方式为点载荷,用于激励表面波和斜入射 SV 波。在铝管上方设置 24 个加载点,加载点与聚焦点之间的坐标距离差为 1.0 mm。仿真中,所有点载荷加载大小相同的力。设波长为 2.0 mm,计算可知斜入射的 SV 波和表面波的最佳激励频率分别为 1.56 MHz 和 1.45 MHz。但考虑到表面波在接近最佳频率时均可被有效激发,选择统一的 1.56 MHz 频率进行激励。激励力的函数描述如下:

$$\begin{cases} y=0.5A\left(1-\cos\dfrac{2\pi ft}{n}\right)\cos 2\pi ft & 0<t\leqslant nT \\ 0 & t>nT \end{cases} \tag{9}$$

为了降低表面波在这些边界的反射,从而降低信号接收的干扰,管道的左、右以及底部边界均配置

为低反射特性。进行曲折线圈电磁超声的有限元仿真时,由于铝管样本中产生的感生电压及由激励产生的表面波幅值与计算时间步长和网格尺寸有关,当计算时间步长不超过 $1/(100\times f)$,最大网格尺寸不超过 $\lambda/10$,且线圈内集肤层网格数量不少于 3 时,有限元分析结果呈现出收敛性。所采用的几何模型基于自由三角形网格划分,其中最大网格尺寸为 0.325 mm,接近于超声波波长的十分之一。

2.2　声场仿真分析

内部缺陷与表面缺陷声场云图如图 4 所示,图 4(a)与图 4(b)分别展示了不同时刻的超声波位移云图。激发出的超声波包括 SV 波和表面波。

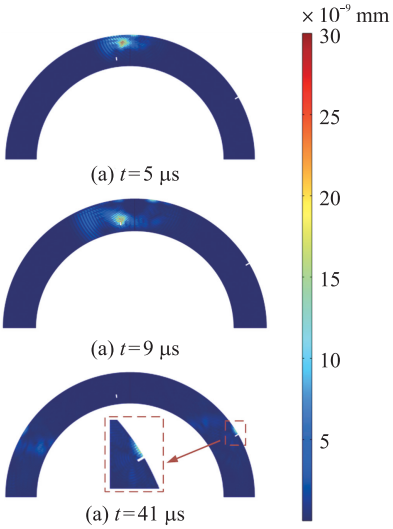

图 4　管道 SV 波与表面波位移云图

从图 4 可以看出,超声波在管道表层生成并沿着一个倾斜角度在管道内部和表面传播,在管道内部传播的超声波最后形成聚焦。另外,从图 4 还可以看出,表面波在传播过程中模式比较纯净,当经过缺陷时,反射率较高。另外,随着传播时间的增加,表面波能量衰减较慢,而体波衰减较快。

2.3　传播特性分析

为了定量分析线圈激发的线聚焦 SV 波的声场分布情况,在铝管表面的曲折线圈正下方取一条截线进行研究,通过分析该截线的平均振动分量从而分析接收到的单向聚焦 SV 波与表面波幅值。

将激励信号加载于曲折线圈,从其下方的管道表面提取水平位移作为接收信号,得到图 5 所示的压力管道缺陷检测信号。从图 5 中可明显识别到缺陷的反射回波信号。

但是,从图 5 中能观察到周向导波受到杂波影响的现象。随后对图 5 信号进行了频谱分析,得到图 6 所示的回波信号频谱。从图 6 中可以看出,信号主要频率成分与激励信号一致,图 6 表明,两个波包内回波信号为缺陷的回波信号。

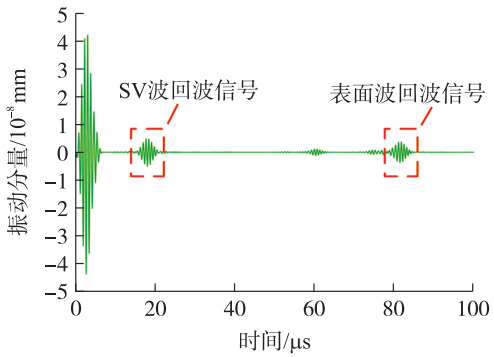

图 5　压力管道缺陷检测信号

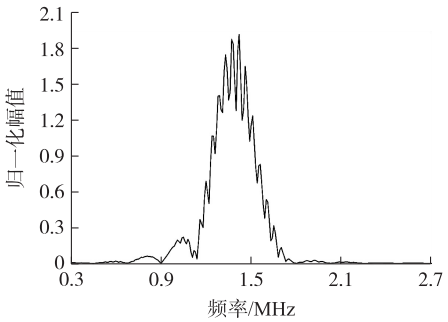

图 6　频谱分析

3　实验与结果

3.1　实验平台的搭建

如图 7 所示,实验系统由示波器、Ritec-5000 高能脉冲发射/接收仪、铝管试件以及研制的电磁超声传感器组成。在该平台中,Ritec-5000 产生 1.56 MHz 的 Tone-burst 激励信号并接收感应信号。通过阻抗匹

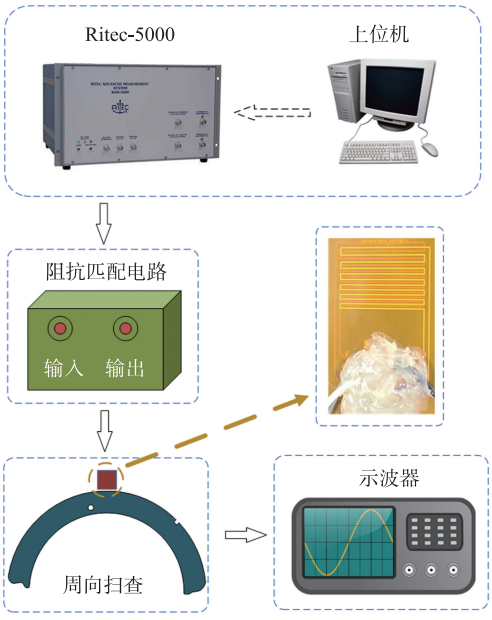

图 7　实验系统平台

配,该信号激励电磁超声换能器同步产生单向 SV 波和表面波。随后反射波被接收传感器捕捉到,并通过 Ritec-5000 高能脉冲发射/接收仪器内的放大器进行放大。经过带通滤波器的滤波处理后,最终同始波一起显示在示波器上。

EMAT 的一致性和重复性对于估计裂纹与通孔缺陷的位置至关重要。本文研究设计了一种自发自收的双层 EMAT 用于激励与接收 SV 波和表面波。其中 EMAT 探头采用的线圈是曲折式的聚焦线圈设计,顶层与底层都配置了不等间距的相邻导线间隔,顶层与底层线圈激励信号相位相差设置为 90°,以满足探头超声单向激励与聚焦的条件。永磁铁长×宽×高=20.0 mm×30.0 mm×10.0 mm,剩余磁通密度为 1.2 T,其充磁方向与 40 mm×40 mm 的平面垂直,线圈与铝管试件外表面贴合。双层柔性线圈线径为 0.2 mm,其他参数与理论仿真一致。

如图 8 所示,实验试件是一个直径为 200 mm 的压力管为厚壁铝管。在样品上制作了一个直径为 4.0 mm 的通孔,作为管道的内部缺陷;此外,在铝管外壁上,加工了一个长 20.0 mm 宽 2.0 mm、深 2.0 mm 的矩形槽,用于模拟表面裂纹缺陷,两种缺陷与探头之间的相对位置与仿真保持一致。

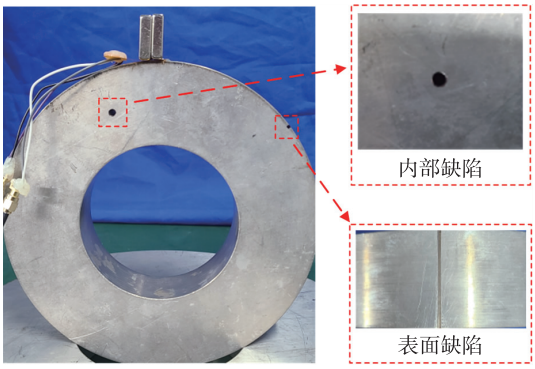

图 8 待测厚壁压力管道

3.2 压力管道试件实验测试

接着,利用论文搭建的实验平台测试压力管道实验试件。探头激励信号频率为 1.56 MHz,回波信号经过 FFT 滤波后,得到图 9 所示的回波信号。

从图 9 中可以观察到,在 16.05 μs 时 EMAT 接收到了由试件内部通孔缺陷反射的 SV 波回波信号,在 75.6 μs 时 EMAT 接收到了由试件表面矩形槽反射的表面回波信号,两种回波信号所在位置与理论时间基本一致。且 SV 波回波信号峰峰值为 0.22 V,表面波回波信号峰峰值为 0.16 V,而噪声峰峰值仅为 0.02 V,说明本文提出的单向聚焦 SV 波与表面波同步检测方案检测灵敏度和信噪比较高,

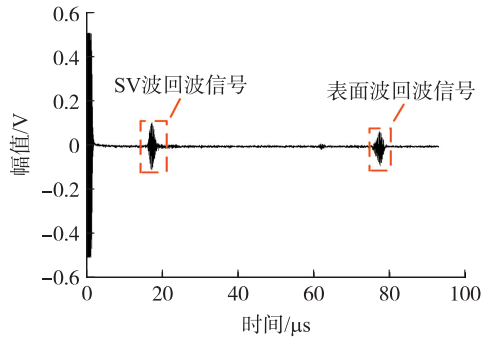

图 9 压力管道试件深层与表层缺陷的同步检测信号

能准确地检测到试件表面缺陷与内部缺陷。在周向扫查时,激励出的 SV 波信号与表面波信号可覆盖管道所有区域。以上结果表明,论文提出的单向聚焦 SV 波与表面波同步检测方案能够用于壁厚管道深层缺陷与表层缺陷的同步检测。

4 结论

论文设计了一种用于壁厚压力管道深层与表层缺陷的同步检测探头及检测系统。

首先,根据数学叠加原理和 SV 波聚焦原理,利用有限元仿真方法建立了曲折线圈检测模型,研究复合探头的单向聚焦 SV 波与表面波同步激励方法;其次,研究复合信号分离策略及深层和表层缺陷对两种信号的影响规律;最后,制作探头实物,并开展实验研究。实验结果表明:论文设计的复合检测探头可从厚壁管道外部探测到外表面长 20.0 mm、宽 2.0 mm、深 2.0 mm 的裂纹,以及内部直径为 4.0 mm、深度为 20 mm 的通孔缺陷。其 SV 波回波峰峰值为 0.22 V,表面波回波峰峰值为 0.16 V。在周向扫查中,激励出的复合信号能够覆盖厚壁管道的全部检测区域,且通过单向激励提高了 SV 波与表面波的回波幅值与信噪比。探头经过进一步优化,有望用于压力管道深层与表层缺陷的同步检测。

参考文献:

[1] 周浩青,侯兆泷. 工业管道安全使用情况调研与分析[J]. 中国设备工程,2023(7):262-264.
[2] 强敏娜,张良,王永乐,等. 在用压力管道裂纹检验中无损检测技术分析[J]. 山西化工,2023,43(1):160-161,166.
[3] 张哲语. 超声波探伤技术在钢结构无损检测中的应用[J]. 冶金管理,2021(13):45-46.
[4] 陈庆,刘书麟,程学晶,等. 压力管道用柔性石墨不锈钢波齿复合垫片压缩-回弹性能优化试验研究[J]. 压力容器,2016,33(11):20-23.
[5] 陈庆,李君,卜辛国. 压力管道用金属波齿结构力学性

能研究[J]. 化工机械,2010,37(6):730-731,754.
[6] 黄松岭,王哲,王珅,等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报,2018,39(3):1-12.
[7] 何存富,邓鹏,吕炎,等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报,2017,53(4):59-66.
[8] 杨理践,张佳,邢燕好,等. 一种管道中 T(0,1)模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2):98-106.
[9] 张金,董子华,石文泽,等. 厚壁管道线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场分析[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):150-160.
[10] 付悦,李素军,陈果,等. 高温铝合金电磁超声 SV 波检测方法研究[J]. 传感技术学报,2023,36(3):380-388.
[11] 兰菊,Gdoutos E E,贾晓娟,等. 单向表面波电磁超声换能器优化设计[J]. 中国测试,2025,51(3):87-95.
[12] Xie Y D,Yin W L,Xu L J. Investigation of Beam Features of Unidirectional Rayleigh Waves Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) by a Wholly Analytical Solution [M]//Tian G Y,Gao B. Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XXIII), Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2020:120-125.
[13] Zhan Z F,Wang F P,Wang S. A New Omni-Directional EMAT Using Contra-Flexure Coils for Plate Inspection [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Nanoscience and Technology(ICNST),Chengdu,China,IEEE,2021:14-21.
[14] Wang S,Su R,Chen X,et al. Numerical and Experimental Analysis of Unidirectional Meander-Line Coil Electromagnetic Acoustic Transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics,Ferroelectrics,and Frequency Control,2013,60(12):2657-2664.
[15] Martinho L M,Kubrusly A C,Kang L,et al. Enhancement of the Unidirectional Radiation Pattern of Shear Horizontal Ultrasonic Waves Generated by Side-Shifted Periodic Permanent Magnets Electromagnetic Acoustic Transducers with Multiple Rows of Magnets [J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(8):7637-7644.
[16] Sun H,Huang S,Wang Q,et al. Improvement of Unidirectional Focusing Periodic Permanent Magnet Shear-Horizontal Wave Electromagnetic Acoustic Transducer by Oblique Bias Magnetic Field[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2019,290:36-47.
[17] Rieger K,Erni D,Rueter D. Unidirectional Emission and Detection of Lamb Waves Based on a Powerful and Compact Coils-Only EMAT [J]. NDT & E International, 2021,122:102492.
[18] 陈涛,楼听雨,吕程,等. 一种基于惠更斯原理的 Rayleigh 波单向点聚焦式电磁超声无损检测装置:CN116735722A[P]. 2023-09-12.

陈　涛(1986—),男,汉族,通讯作者,河南固始人,副教授,博士,研究领域为传感器与仪器仪表、无损检测新技术及自动化检测装备,chentao@hnu.edu.cn;

刘书成(1998—),男,汉族,湖南人,湖北工业大学硕士研究生,主要从事电磁超声检测的研究,574249961@qq.com。